

落石対策

3. 落石の調査

中筋章人 (なかすじ あきと)
国際航業株式会社センター

上野将司 (うえの しょうじ)
応用地質株式会社本部

3.1 調査の目的と手順

落石の調査は、対象とする区間あるいは斜面での落石災害発生の可能性について検討し、落石対策計画立案のための基礎的な情報を得ることを目的とする。基礎的な情報とは、落石発生の場所・規模・形態・時期・影響度合いなどに関するものであるが、実際には落石発生にかかわる素因と誘因が多岐にわたるため、それらのすべてを明らかにすることは困難である。対策計画に携わる技術者はこのような落石調査の問題点や限界を十分に理解した上で実施することが望まれる。落石調査の手順は図-3.1に示すとおりであるが、大別すると概査、精査および維持管理調査に分けられる。それぞれの調査目的と手順をまとめると次のようになる。

(1) 概査

概査の目的は、斜面や法面の落石発生源に関する情報を整理するとともに、その安定度を斜面単位で大まかに判定し、精査あるいは緊急な対策の必要性を判断することにある。したがって、概査の内容は既存の資料調査、小縮尺の空中写真判読、簡便な現地踏査等の比較的経済的な調査によって構成され、その対象斜面の範囲は尾根までとすることが望ましい。

(2) 精査

精査の目的は、概査や維持管理点検調査によって精査

が必要と判断された斜面や法面を対象とし、浮石や転石の分布状況とその不安定度、落下経路、斜面の不安定化機構等を明らかにするとともに、対策の要否の判断、対策工の選定あるいは設計施工のための基礎資料を得ることにある。したがって精査は、精密測量、大縮尺の空中写真の判読、詳細な現地踏査などにより構成され、場合によっては、ボーリングやサウンディング、物理探査等が実施される。

(3) 維持管理調査

維持管理調査の目的は、斜面防護工のみならず地山を含めた斜面や法面全体の劣化や変状を定期的に観察・計測することによって災害の発生を未然に防ぐことにある。したがって、維持管理調査は幾つかの着目点のチェックを主体とした現地踏査および前回調査との対比による劣化進行部の確認などを基本とするが、必要に応じて計器による動態観測も補助手段として用いる。

3.2 概査手法

落石概査の主な調査手法には次の項目があり、以下に具体的に記述する。なお、すでに確立され一般的となっている手法はごく簡単に述べることにする。

- ①資料調査 ②リモートマッピング ③空中写真判読
④現地踏査 ⑤斜面の安定度評価

3.2.1 資料調査

事前に既存資料を収集・整理し分析しておくことは、その後の調査の効率化をはかる上で重要である。

概査に、あるいはその後の精査にも欠かせない資料としては、基礎資料として公刊の地形図や地質図などがあり、これによって地形、地質、土地利用、斜面災害、気象条件などについての総括的な情報を得ることができる。さらに落石災害にかかわるものとして道路・鉄道ともに既存の防災点検報告書や防災カルテ、災害パトロール記録などがあり、これらは斜面の実態把握のために欠かせないものである。既存資料の入手先は、落石対策便覧¹⁾などに一覧表として示してあるため、ここでは省略する。なお、地形図は、一般的に概査段階では1/5 000~1/25 000、精査段階では1/200~1/2 500の縮尺が用いられている。

3.2.2 リモートマッピングによる地形情報

現地踏査や空中写真判読を行っても、その情報を表現すべき適当な地形図(例えば1/5 000)が踏線沿いに、特に尾根部まで含めたものが整備されていないことが多

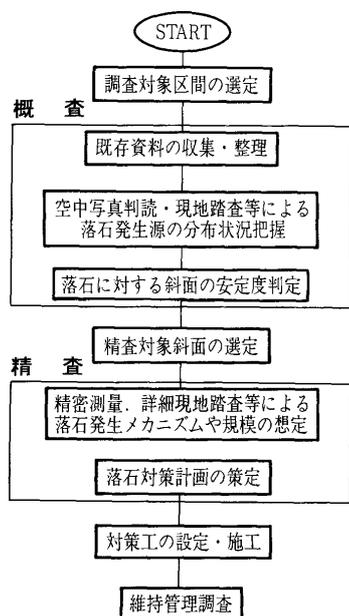


図-3.1 落石調査の流れ図

講座

い。しかし、ここ1~2年で急速に実用化された上空からのレーザスキャナによる直接的な三次元計測手法は、地形データを速く精密に入手することを可能にした。これは、航空機やヘリコプターに搭載したレーザセンサから地表面の情報を測定する技術であり、基本的には、飛行機などの移動体計測技術とレーザセンサ計測技術で構成される。レーザスキャナは、両者を組み合わせることで、地表面の三次元座標値を得ることができるシステムである。また、レーザ計測と同時に航空機に搭載された計測用デジタルカメラで撮影を行うことにより、撮影された画像とレーザデータを複合したデジタル正射写真図が自動的に作成され、これによって誰にでも容易に地物の識別ができるようになる。

以上のレーザ計測手法は、特に露岩地で有効であり、林地でも落葉期に行えば地表面の転石の分布状況が判別できるが、植生繁茂地域では判別に限界がある。

3.2.3 空中写真判読

上空から地表面を撮影した空中写真は、地表のありのままの情報を縮小して記録している。空中写真判読は、隣接する2枚の空中写真を実体視することにより、地形の小さな差異が誇張されて見える利点を生かして、落石崩壊に関する様々な情報を読みとることができる。一般的に落石調査では次のような項目の把握に活用している。

- ① 地形の特徴による斜面の概略的な区分
 - ② 道路からは視覚外となる上部斜面に分布する落石発生源としての不安定物質（崖錐堆積物、崩壊残土、地すべり土塊等）の分布状況
 - ③ 上部斜面のクラックやリニアメントおよび遷急線など落石に関連の深い地形の分布状況
 - ④ 植生の被覆状況や小溪流（ガリー等）の分布状況
- 空中写真判読をした結果は1/5 000~1/10 000程度の地形図に記入し、現地踏査のための予察図とする。さらに現地踏査によって得られた確認事項に基づき、判読結果の見直しと補足を行い、予察図を修正した「落石発生源分布図」とする。

3.2.4 現地踏査

現地踏査は、概査段階で最も多くの情報を入手できる手段であり、後に述べる安定度評価の鍵となるものである。概査としての現地踏査は、現地の情報を幅広く観察する必要があり、それらの観察項目を整理すると表3.1のようになる。

3.2.5 斜面の安定度評価

斜面上の石が落下する可能性は、現地踏査などによって斜面上の浮石や転石の分布状況とその不安定度を目視で判定することによるのが基本である。しかし、そのほかにも斜面上の浮石や転石が不安定化しやすい箇所かどうかを判断するために、表土の侵食しやすさや植生による表層の被覆状況、湧水の状況、あるいは過去の落石の発生履歴や変状の有無なども考慮に入れる必要がある。

概査段階での安定度評価は、個々の石の評価ではなく、転石などが分布する斜面全体の安定性に着目して評価す

表3.1 現地調査で確認すべき情報

項目	細目	内容
落石・転石の分布状況	浮石	分布位置、大きさ、割れ目形状
	転石	分布位置、大きさ、形状、不安定度
植生	粗密度	粗密区分、分布状況
	樹種・樹高	樹種、樹高、太さ
未固結堆積物の性状	種類と構成物	段丘、崖錐、火山灰等の種別と礫・砂等の構成物
	堆積物の状況	固結度、厚さ、湧水等
地質構造	地層の状況	地層の分布状況、境界、走向・傾斜等
	割れ目の状況	断層・破砕帯の規模、節理の状況等
岩盤の性状	岩相・岩質	岩盤の種別と強度等
	風化・変質	風化の程度、変質の程度

るものが多い。過去の多くの判定手法や最近の代表的な手法は、道路や鉄道関係のマニュアル類^{2),3)}に紹介されている。

3.3 精査手法

ここでは、代表的な精査手法とその実施例について紹介する。

3.3.1 詳細地表踏査による転石の安定度評価事例

ここに紹介する事例は、まず概査により斜面全体の落石発生源分布状況を把握したのち、斜面に分布する主要

浮石カード

転石番号	タイプ	浮石	落石タイプ	単独落石
石の形状	幅	1.6 m	形状	角
	高さ	0.6 m	体積	1.2 m ³
	奥行き	1.2 m	重量	3.0 t
石の性状	岩質	砂岩	硬さ	軟
亀裂あり	方向	不規則	傾度	(斜)
	開口度	<30°	開口度	開口幅
岩盤状況	岩盤高	1.3 m	湧水	湧水
	亀裂	方向	不規則	受・流盤
亀裂	開口度	<30°	開口亀裂の連続性	不連続
	斜面状況	地形	岩盤	土質
安定度状態				不安定 やや不安定 安定
調査者のコメント	母岩より分離した状態であるが、岩塊にはさまる状態である。			緊急性 有・無

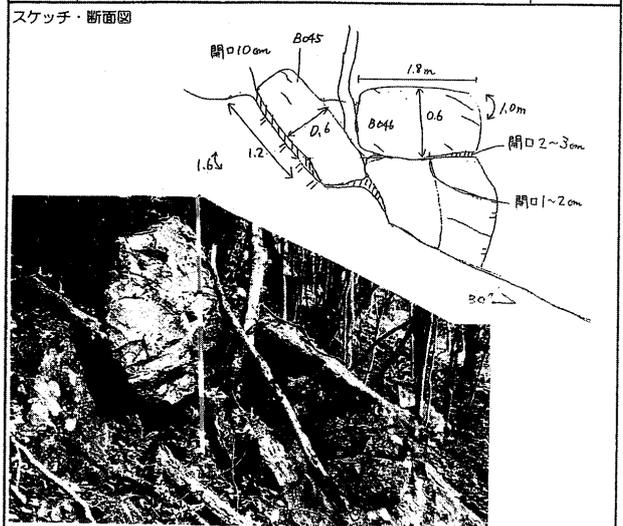


図3.2 浮石の調査カード

表—3.2 転石の現地検得点表

斜面状態 (A)		露出状況 (B)		停止状況 (C)		形状 (D)		安定計算 (E)*	
急崖上	5	完全露出	5	完全露出+木で停止	5	球形・円筒状	5	ランク I	5
急傾斜	4	2/3 以上露出	4	完全露出+不安定な石で停止	5	角形	3	ランク II	3
やや緩傾斜	3	2/3~1/2 露出	3	完全露出+石で停止	2	偏平	0	ランク II	0
下部平坦面	2	1/2 以下露出	1						
平坦面	1								

(A) × (B) + (C) + (D) + (E)

*安定計算は、完全露出の転石・浮石に対して、地震時に斜面直交方向の力が加わった場合を想定し、転倒と滑動の安全率を算定した。また、安全率が1.0と1.5を境にランク区分を行った。

表—3.3 浮石の現地検得点表

分離状態 (A)		底面の傾斜 (B)		受・流れ盤 (C)		オーバーハング (D)		安定計算 (E)*	
完全に分離	15	30度以上	2	流れ目	4	あり	1	ランク I	5
下部の侵食が進行	10	30度未満	1	受け目	1	なし	0	ランク II	3
不安定な形状	5			なし	0				
亀裂が発達	1								

(A) × (B) + (C) + (D) + (E)

な転石・浮石^{注1)}を対象として地表踏査による詳細調査を行い、それらの安定度を評価したものである。

(1) 現地調査

現地では、図—3.2に示す調査カードを用いて転石・浮石の形状・性状、斜面状況や岩盤状況などを観察し、断面スケッチを作成して、正面写真、側面写真を撮影した。また、専門家(点検技術者)による安定度評価を行い、安定度評価の根拠や特記事項をコメントした。さらに、調査した転石・浮石には、ナンバーを記入したプレート(アクリル板)を接着剤で直接貼り付けた。

(2) 転石・浮石の安定度評価

転石・浮石の安定度評価は、現地調査の点検項目(露出状況や根入れ状況など)を得点化したものに、現地調査における専門家(点検技術者)の目視評価の重み付けをして安定度評価得点を求めて評価した。

ここで、現地検項目得点の内訳は、表—3.2と表—3.3に示すが、この持点40点に加える目視評価得点は、20点、40点、60点がそれぞれ現地における目視評価の『安定』、『やや不安定』、『不安定』に対応することとした。安定度評価得点は100点を最高得点とし、これらの得点をさらに下記のように3段階に区分して総合評価とした。

○ランク A ; 75点以上

◆ 滑落する可能性が極めて高く、かつ緊急性あり

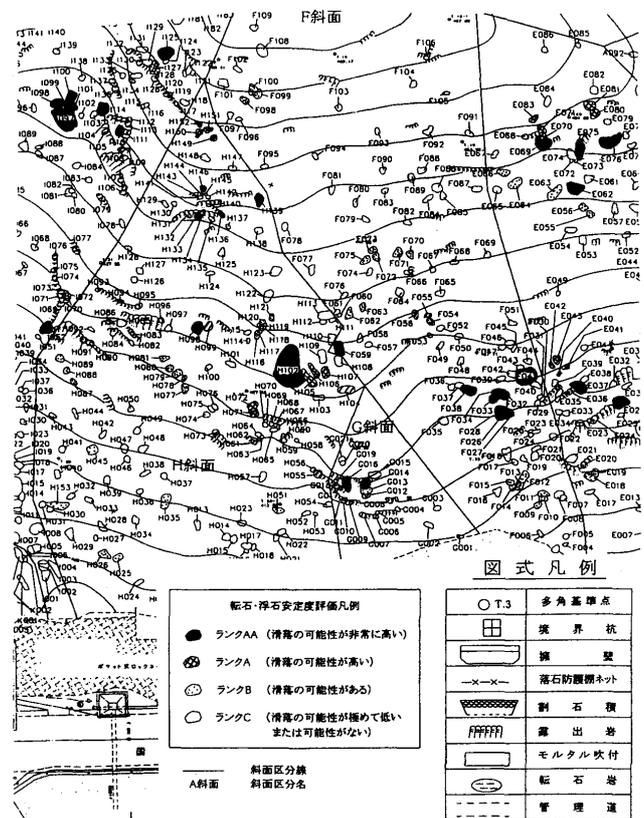
○ランク B ; 45点以上75点未満

◆ 滑落する可能性が大きい、または可能性がある

○ランク C ; 45点未満

◆ 滑落する可能性が低い、または可能性がない

個々の転石・浮石の評価結果は、図—3.3のように平面図上に整理して表示した。



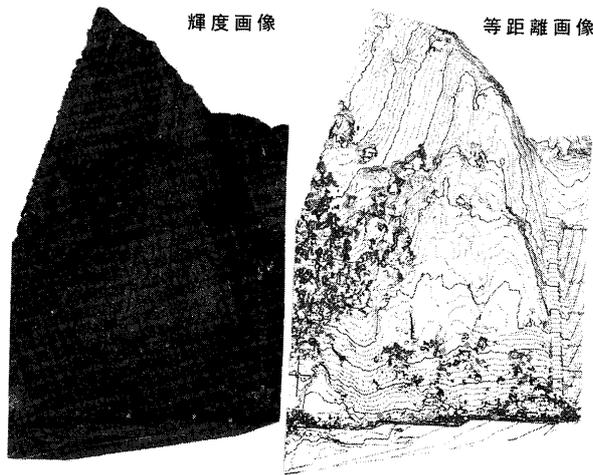
図—3.3 転石・浮石の安定度評価図

3.3.2 地上型3Dレーザスキャナを用いた精密計測

近年開発されたノンプリズム型の3Dレーザスキャナは、三次元のスキャニング(対象物の表面形状をとらえる)技術であり、これにより高速・高精度で地形計測が可能となった。この地上型3Dレーザスキャナは、距離測定用レーザの放射角を2軸の機構によって制御し、その距離と放射角度から対象物の三次元位置を計測するものである。これにはいろいろな機種があるが、標準的なものは反射板なしで350 mまで遠方の自然対象物が計

注1) 「浮石」は、鉄道関係では一般的に「浮き石」と書かれるが、本講座では、落石対策便覧¹⁾に従って用いることとする。

講座



図—3.4 地上型3Dレーザスキャナーによる精密計測例

測でき、測定用のパルスレーザを垂直・水平方向にそれぞれ $\pm 40^\circ$ 、最大 340° の広角で高速に放射し、その範囲内にある対象物の三次元位置、断面、地形等の計測を行う表面イメージングシステムである。

この計測手法にデジタルカメラを併用することによって、岩盤斜面の亀裂・浮石・オーバーハングなどの形状が判読できる。実用例はまだ少ないが、今後は落石発生源の安定度評価の有力な補助手段になると考えられる。計測の一例を図—3.4に示す。

3.3.3 熱赤外線撮影

熱赤外線撮影は、直接的な調査が困難な急崖露岩部で、表層の浮石を非接触で抽出する調査手段である。離れた地点から岩盤表面を経時的に熱赤外線撮影し、温度変化の大小により背後の岩盤から分離した浮石の位置や範囲を推定することができる。吹付け法面の劣化診断調査方法、判読法、総合評価法については、マニュアル化されたものがある⁴⁾ので利用できる。

3.3.4 ボーリング

比較的規模の大きな転石や浮石の場合、転石の埋没部分の大きさや浮石背後の分離面深度を確認する目的で、転石上や岩盤斜面から様々な角度でボーリング調査が実施される。転石の場合は背後に表土や崩積土が分布するため大きさの確認は容易であり、多数の転石が分布する場合でも数本の調査で周辺を含めた転石の大きさの想定は可能である。

浮石は岩盤斜面の調査と同様であり、背後の割れ目の開口が大きければ不安定岩塊の大きさの確認は容易であるが、開口幅が数ミリ以下の場合や複数の割れ目がある場合はボーリング調査のみでは想定困難である。このような場合、ポアホールカメラによる孔内撮影で、割れ目方向、間隔、開口幅などの詳細を明らかにすることができる。斜面表面の浮石以外に、目視では確認困難な背面の不安定岩塊の存在も把握できるので急速に普及した調査手段である。

ただし、ボーリング調査は急斜面での試錐機の搬入や給水・仮設に難があるため、その適用斜面は限られる。

3.3.5 物理探査

ボーリング調査と同様に転石や浮石の大きさを把握する目的で行うものと、岩塊の安定性を客観的に評価する目的で実施するものがある。前者は、地下レーダー⁵⁾、弾性波反射法⁶⁾、反射波・周波数特性法、電気探査、超音波探査などがあり、後者では転石の振動特性に注目した調査法⁷⁾がある。いずれも実務での適用例は少なく研究段階の探査手法であるが、斜面での作業性を考慮した探査機器の小型軽量化、測定の手軽化、解析手法の確立等により、急速に普及することが期待される。

3.4 維持管理調査としての動態観測

代表的な動態観測である落石検知システムは、落石の発生と位置をいち早く検知し、交通を制御する目的で設置される。鉄道では交通制御が比較的容易なため、落石を検知して落石発生区間に列車を入れないような断線式のシステムが全国的に広く普及している。しかし、道路ではリアルタイムでの交通制御が困難なために採用されたケースは少なく、後述する変位計測システムの導入がはかられつつある。これらの落石監視計測手法を一覧表としてまとめたものが表—3.4であり、以下に代表的なものについて述べる。

3.4.1 落石検知システムとその事例

落石検知システムは、断線式のほかに振動式や受圧式の実績があり、単独で設置したり、落石防護柵やロックネットなどの対策工と併設するような待受け型計器である。

最近ではITVカメラによる画像処理で斜面からの落石を検知するようなシステムが実用化され、斜面上部の落石発生域や斜面下部の落石到達域での検知への利用が考えられている。これは動きのあるものを自動的にとらえるシステムであるため、植生が多い場合の樹木の揺れなどに反応することになるので植生のまばらな岩盤斜面向きといえる。このほかに研究レベルの機器として光ファイバー、AE (Acoustic Emission) があり、いずれも落石発生域でのシステムとして今後の開発が期待されている。

落石検知システムは断線式以外では落石頻度も計測することができるので、大規模な落石や岩盤崩壊の兆候の把握に利用できる可能性がある。崩壊予測までは困難であるが、このような観点から、斜面防災分野で今後の適用が進むものと思われる。

落石検知システムは、鉄道で広く普及しているので、鉄道の標準的な例³⁾を図—3.5に示す。ここに示す落石検知システムは断線式であり、一定間隔に支柱を設けてビニール被覆線を検知線として張り、常時通電させるものである。落石が検知線を破断すると警報装置が作動し、運転指令所や隣接駅などに警報を発し列車を防護するシステムである。検知線は単独で直接設置する形式と落石防護柵などの防護工と併設する形式がある。

3.4.2 落石監視システムとその事例

落石の発生監視システムには、地すべり動態観測と同

表-3.4 落石監視計測手法一覧表

	計測機器	計測タイプ内容等	適用限界	計測対象			計測方式		実績	精度
				転石	浮石	大規模岩盤	直接	間接		
落石検知	断線式	待受け型落石検知		◎	◎	◎	○		A	A
	振動式	待受け型落石頻度計測, 検知	防護工に異常が無い場合にも反応する。	◎	◎	◎	○		B	B
	受圧式	待受け型落石頻度計測, 検知	同上	◎	◎	◎	○		B	B
	画像処理	待受け型落石頻度計測, 検知 発生域落石頻度計測, 形状変化計測	夜間は高感度カメラが必要 視界不良, 植生繁茂地では計測困難	○	◎	◎		○	C	B
	光ファイバー	発生域落石検知	設置に工夫を要す	○	○	○	○		C	C
	AE	発生域不安定化検出	設置に工夫を要す	×	○	○	○		C	C
変位計測	伸縮計	個別相対変位		○	◎	◎	○		A	A
	傾斜計	個別絶対傾斜変動		○	◎	◎	○		A	A
	亀裂変位計	個別相対変位	大変位の計測困難	×	◎	○	○		A	A
	光波測距	多点絶対変位	視界不良時の計測が困難	◎	◎	◎		○	A	B
	写真計測	多点絶対変位	植生繁茂地, 視界不良時の計測困難, 自動計測が困難	○	◎	◎		○	B	B
	GPS	個別絶対変位	上空視界の確保, 精度がやや劣る	×	○	◎	○		C	B
	光ファイバー	多点相対変位	大変位の測定困難	○	○	○	○		C	C

記号説明

(計測対象) ◎: 適するもの, ○: 適する場合と適さない場合があるもの, ×: 適さないもの

(実績) A: 多い, B: 少ない, C: 研究段階

(精度) A: 良い, B: やや良い, C: 現状では問題があり改善を要す

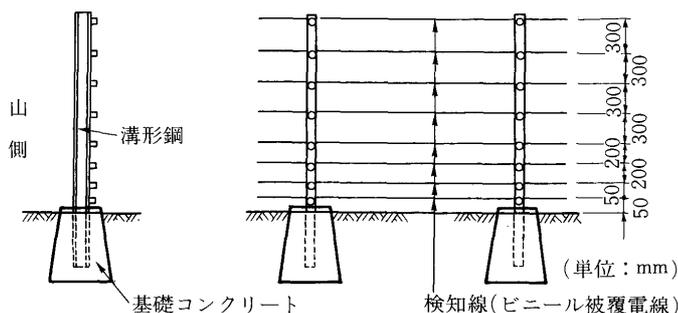


図-3.5 鉄道の落石検知システム例

種の変位測定機器が多いが, 落石発生機構がよくわかっていないため, 地すべりのように変位量や変位速度から崩壊時期を予測することは現状では困難である。したがって落石発生源での計測監視は, 不安定化の進行の把握, 対象規模や崩壊形態の想定などにより対策の優先度や工法検討に生かすことが主眼になる。また今後の予知予測問題の取組みのため, 観測事例を蓄積整理することが求められている。

変位計測機器は伸縮計, 傾斜計, 亀裂変位計等, 地すべり計測で実績のある機器であるが, 地すべりとは異なる

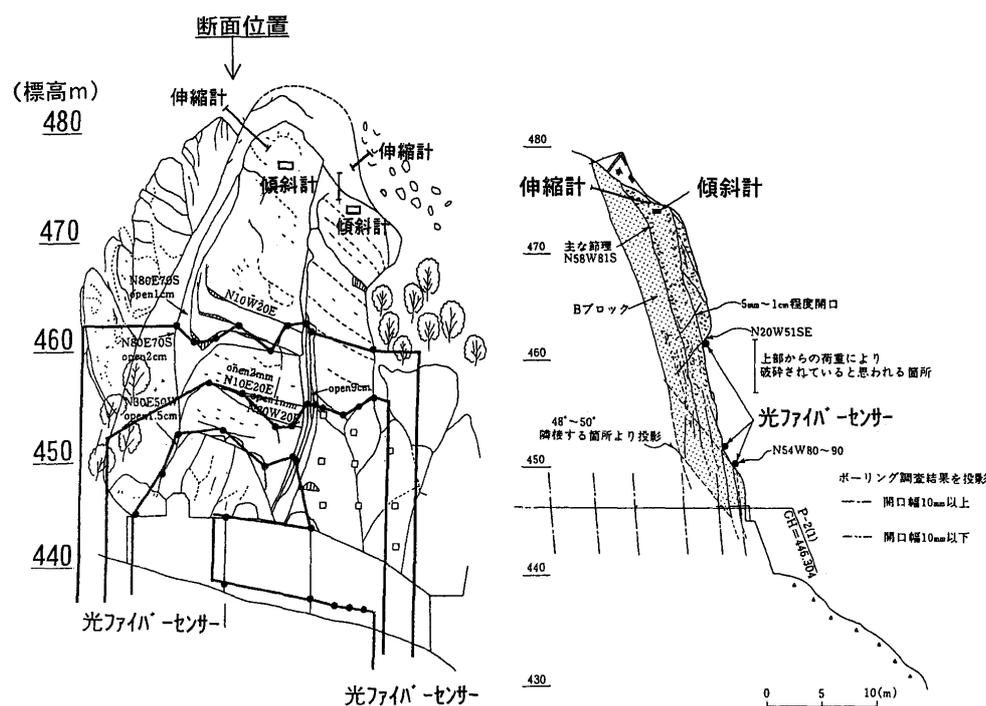


図-3.6 変位計測システムの一例

講座

って微小変位の計測が要求されるので温度の影響を除く必要がある。これらの機器は個々の転石や浮石の変位を直接計測するもの（個別変位計測）であるが、多くの落石発生源を非接触で間接的に計測する（多点変位計測）手法もある。この手法として、精度的にはやや劣るが、光波測距や写真計測が実用化されており、見通しの良い岩盤斜面では多くの落石対象（例えば浮石や亀裂）の変位を短時間で計測可能である。研究レベルのものとして、GPSや光ファイバーがあげられる。将来的にはGPSは対象が大規模な場合に有効であり、光ファイバーは落石源の初期変動の把握に有効と考えられる。

斜面監視を目的とした変位計測システムは、ソフト的な道路防災対策として近年積極的に導入されており、その一例として道路上方の岩盤斜面の計測システム装置例⁸⁾を図-3.6に示す。この岩盤斜面の崩壊形態は、節理の発達状況からみて、下半部での岩塊が抜け落ちることにより上部斜面が落下するものと想定されている。計測機器は、想定崩壊形態を考慮して伸縮計と傾斜計を斜面頂部付近に設置し、光ファイバーセンサーを下半部の主要な亀裂30箇所に設置している。光ファイバーセンサーは新たに開発したものであるが、従来計器のような雷被害が無く急斜面での維持管理が軽減できる特徴がある。この計測箇所では24 mmの変位が検出されると警報が発せられ、ITV画像で状況を確認した上で対策がとられることになっている。

3.5 今後の課題

落石調査は、対象が小規模であり、かつ植生の繁茂する急斜面が多いことから、小縮尺の空中写真判読やリモートセンシングの適用が困難である。したがって、これまでは専門家の現地踏査が主体であった。近年、大縮尺の地形図作成が容易になったり非接触探査技術の向上により、落石調査にも各種の調査手法が導入されつつある。一方では落石シミュレーション技術（4.3節に後述）の進展等で、高い精度の調査が要求されるようになった。このような状況下で落石調査の効率化と精度の向上が期待されているが、一方では以下に示すようないくつかの課題がある。

(1) 大縮尺地形図の整備

落石調査では、基本的に対象岩塊の位置や規模が地形図上に表現できることが重要である。小縮尺の地形図では落石危険区域を概括した範囲しか表現できず不相当であり、落石規模に応じて1/200～1/2 500程度の大縮尺の地形図が必要である。しかし、多くの場合未整備であるので、本文で述べたりリモートマッピング技術などを導入して保全対象周辺における大縮尺地形図の整備を逐次進めるべきであろう。

(2) 落石発生源の効率的な調査

転石、浮石などの落石発生源については、大縮尺の地形図を用いて現地踏査で位置や安定度などを調査することになる。また、植生分布が落石の発生、落下経路、運動エネルギーに大きく影響することが考えられ、樹種、幹径、植生密度などを同時に把握する必要がある。現状ではこれらの詳細調査は現地踏査を主体とするが、今回紹介した各種調査を含め急斜面という条件下での効率的な調査方法を確立する必要がある。

(3) 落石発生誘因の解明

これまで多くの落石事例があるが、落石発生の直接的誘因については、必ずしも明らかになっていない。誘因としては、①雨水による周辺地盤の侵食や崩壊の発生、②地震動、③凍結融解、④強風による樹木の揺れや倒木の影響、⑤動物の移動の影響など、様々である。多くの事例で落石の誘因が明らかになれば、現状では困難な落石の予知予測が、対象とする斜面では何を重点的に観測すればよいか明らかとなるであろう。今後は、計測箇所での不安定化事例や落石事例に注意して誘因分析を進め、誘因を明らかにし得た事例の蓄積に努める必要がある。

(4) シミュレーションの活用

大縮尺地形図上に落石発生源、落下経路の植生、対策工や保全対象の位置がGIS化されれば、数値シミュレーション手法によって任意断面での落石の具体的な運動が計算できる。さらに、この数値シミュレーション手法を活用することによって、落石が発生した場合の影響をある程度定量的に表現したハザードマップ⁹⁾の作成が期待される。

参考文献

- 1) 社)日本道路協会；落石対策便覧，2000。
- 2) 財道路保全技術センター；平成8年度 道路防災総点検要領（豪雨・豪雪等），1996
- 3) 財鉄道総合技術研究所；落石対策技術マニュアル，1999。
- 4) 建設省土木研究所；熱赤外線映像法による吹付けのり面老朽化診断マニュアル，財土木研究センター発行，pp. 17～55，1996。
- 5) 綱木亮介・笹原克夫・小島伸一；地下レーダーによる急傾斜地調査について，地すべり研究，Vol. 39，pp. 65～79，1995。
- 6) 海野忠行・今村教夫・呉 佳華・渡子直記；弾性波反射法を利用した転石等根入れ深度探査手法の開発，全地連技術フォーラム'98予稿集，pp. 333～334，1998。
- 7) 竹内孝光・原田初男・三塚 隆；落石危険度判定のための振動測定，物理探査学会第97回学術講演会論文集，pp. 64～67，1997。
- 8) 建設省関東地方建設局長野国道工事事務所；長野国道防災監視観測システム（パンフレット），1999。
- 9) 上野将司・大河原彰；落石のハザードマップ（基図としてのあり方），日本応用地質学会平成12年度シンポジウム予稿集「斜面ハザードマップの現状と課題」，pp. 58～65，2000。